

## Література

1. Торбан С.С. Промысловые механизмы для комплексной механизации кошелькового лова рыбы. / С.С. Торбан // М.: Пищевая промышленность, 1971 – 384 с.
2. Фещенко С.Ф. Асимптотические методы в теории линейных дифференциальных уравнений. / С.Ф. Фещенко, Н.И. Шкиль, Л.Д. Николенко // К.: Наукова думка, 1966 – 252 с.
3. Фридман А.Л. Теория и проектирование орудий промышленного рыболовства. / А.Л. Фридман // М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981 – 328 с.

**Abstract**

*The article is dedicated to the study of the dynamic loads of seine-selective complex in the process of pursing.*

*The pursing process is the second stage of fishing by the purse seine. The pursing should be carried out at such a rate to prevent the escape of fish from the seine. For this purpose, generally the seine is pursed as quickly as possible. At this stage, seine-selective complex undergo big dynamic loads. Their quantity is determined by external factors such as wind, current, waves, etc.*

*As a result of the research the mathematical model of the seine-selective complex operation during pursing was obtained. The difference of obtained model from existing ones consists in representation of a purse line in the form of a variable length thread. The result of simulation conforms to the experimental data. The obtained model can be used to design and study seine-selective machines*

**Keywords:** *mathematical model, dynamics of the process, seine-selective complex, variable length thread*

Метою статті є представлення результатів розробки нелінійної об'єктно-орієнтованої математичної моделі мехатронного модуля поступального руху, побудованого із використанням електрогідравлічних перетворювачів нормально-закритого типу. Для вирішення поставленої задачі використовувалися методи електротехніки, теоретичної механіки, гідравліки

**Ключові слова:** мехатронний модуль, електрогідравлічний перетворювач нормально-закритого типу, нелінійна об'єктно-орієнтована математична модель

Целью статьи является представление результатов разработки нелинейной об'єктно-ориентированной математической модели мехатронного модуля поступательного движения, построенного с использованием электрогидравлических преобразователей нормально-закритого типа. Для решения поставленной задачи использовались методы электротехники, теоретической механики, гидравлики

**Ключевые слова:** мехатронный модуль, электрогидравлический преобразователь нормально-закритого типа, нелинейная об'єктно-ориентированная математическая модель

УДК 681.527.3:623.438

# МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ, ПОБУДОВАНОГО ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НОРМАЛЬНО-ЗАКРИТИХ ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

**О.Є. Скворчевський**

Кандидат технічних наук

Кафедра організації виробництва та управління персоналом

Національний технічний університет

«Харківський політехнічний інститут»

вул. Фрунзе, 21, м. Харків, Україна, 61002

Контактний тел.: 050-327-71-21

E-mail: [skvorchevsky@mail.ru](mailto:skvorchevsky@mail.ru)

## 1. Вступ

Останні 25-30 років розвитку гідроприводів спостерігається стійка тенденція до все більшого вико-

ристання гідравлічної апаратури та насосів із пропорційним електричним керуванням. Сформовані наприкінці 80-х років конструктивні схеми пропорційної гідроапаратури, залишаються актуальними і

сьогодні. Також з'являються нові конструкції гідравлічних апаратів.

Як видно із каталогів [1, 2 та ін.] виробників іноземної гідравлічної апаратури, суттєвий прогрес досягнуто в напрямку інтеграції гідроапаратури і насосів із датчиками зворотного зв'язку та керуючою електронікою.

Останнім часом в Україні спостерігається підвищення зацікавленості науковців та інженерів питаннями розробки та використання пропорційної апаратури в системах приводів.

Однак, судячи з публікацій [3-6 та ін.], вітчизняні науковці не можуть відійти від відомих конструктивних схем. З точки зору промислового освоєння виробництва гідравлічної апаратури та насосів із пропорційним електричним керуванням такий підхід не є перспективним.

Лише вихід на ринок із інноваційним конструктивним рядом пропорційної гідравліки дасть достатні конкурентні переваги.

## 2. Аналіз останніх досягнень та публікацій

З огляду на це використання в системах приводів електрогідравлічного перетворювача на основі елемента сопло-заслінка нормально-закритого типу [7] вбачається перспективним.

Важливим етапом обґрунтування доцільності використання перетворювача [7] у складі систем електрогідравлічних приводів є математичне моделювання його робочих процесів.

В роботі [8] автора представлена математична модель багатофункціонального пропорційного електрогідравлічного перетворювача, який є реалізацією запатентованої конструкції [7]. В подальшому на основі математичної моделі [8] визначено статичні характеристики перетворювача при його різних конструктивних параметрах [9]. При стендовому дослідженні експериментального зразка перетворювача результати роботи [9], в цілому знайшли підтвердження, а математична модель [8] підтвердила свою адекватність [10]. В статті [11] представлені результати параметричної верифікації математичної

моделі [8] на основі експериментальних досліджень [10].

Таким чином в напрямку створення електрогідравлічного перетворювача на основі елемента сопло-заслінка нормально-закритого типу приведено значний обсяг робіт.

Однак динамічні характеристики перетворювача залишаються недослідженими.

При подальших дослідженнях електрогідравлічні перетворювачі [7] доцільно розглядати, як складові мехатронних модулів в які окрім них входять виконавчі гідравлічні двигуни, давачі зворотного зв'язку, керуюча електроніка.

Математична модель [8] вже не є придатною для опису робочих процесів мехатронного модуля в цілому.

## 3. Мета дослідження

Метою дослідження є розробка об'єктно-орієнтованої нелінійної математичної моделі мехатронного модуля поступального руху, побудованого на основі нормально-закритих електрогідравлічних перетворювачів [7].

## 4. Розробка математичної моделі мехатронного модуля

На рис. 1 представлена розрахункова схема мехатронного модуля поступального руху, побудованого на основі нормально-закритих електрогідравлічних перетворювачів.

Основними елементами схеми є одноштоковий гідравлічний циліндр із інерційним  $m$  та силовим  $F$  навантаженнями, електрогідравлічні перетворювачі нормально-закритого типу.

С початку розглянемо динаміку мехатронного модуля під час роботи електрогідравлічного перетворювача, підключеного до штокової порожнини гідроциліндру.

Вхідним сигналом модуля є напруга  $U$ , яка подається на обмотку пропорційного електромагніта, в результаті чого в ній з'являється струм  $I$ :

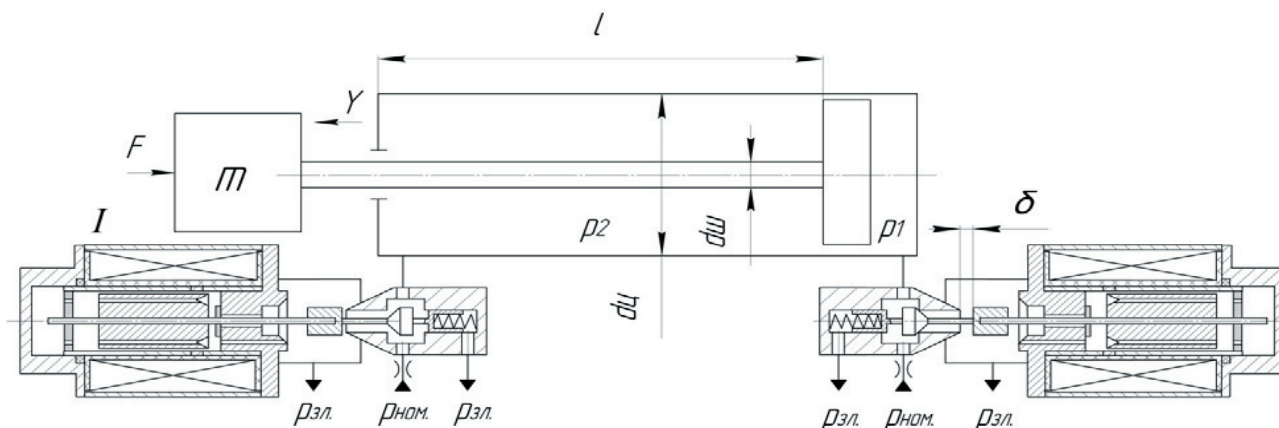


Рис. 1. Розрахункова схема мехатронного модуля поступального руху, побудованого на основі нормально-закритих електрогідравлічних перетворювачів

$$\frac{dI}{dt} \cdot L = U - I \cdot R, \quad (1)$$

де  $t$  – час;  $L$  – індуктивність обвитки котушки пропорційного електромагніту;  $R$  – опір обвитки котушки пропорційного електромагніту.

Динаміка руху заслінки із якорем пропорційного електромагніту описується наступним диференціальним рівнянням:

$$\frac{d^2E}{dt^2} \cdot m_{з.пр} = k_1 \cdot I - c \cdot x - \left( -\frac{1,8}{0,47+v} + 1 \right) \cdot \rho \cdot v \cdot V - \frac{\pi \cdot (d_c^2 - d_E^2)}{4} \cdot p_{11}, \quad (2)$$

де  $x$  – координата положення заслінки із якорем пропорційного електромагніту;  $m_{з.пр}$  – приведена маса золотника із якорем електромагніту;  $k_1$  – коефіцієнт пропорційності по струму електромагніту;  $c$  – жорсткість пружини;  $v$  – кінематична в'язкість робочої рідини;  $\rho$  – щільність робочої рідини;  $V_3$  – швидкість руху золотника із якорем електромагніту ( $\frac{dE}{dt} = V_3$ );  $d_c$  – діаметр сопла;  $d_E$  – діаметр поршня гідростатичного розвантаження;  $p_{11}$  – тиск в каналі сопла.

Оскільки система показана на рис. має модульну будову, довжина каналів, що сполучають перетворювачі із робочими порожнинами гідроциліндру незначна.

Таким чином, тиск у штоковій порожнині гідроциліндра приймемо рівним тиску в міждросельній камері елементу сопло-заслінка.

Тоді тиск  $p_2$  визначається рівнянням нерозривності:

$$\frac{dp_2}{dt} \cdot \frac{4 \cdot E}{\pi \cdot (d_{ц}^2 - d_{ш}^2) \cdot (l - y)} = \mu_{др} \cdot \frac{\pi \cdot d_{др}^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |p_{ном} - p_2|}{\rho}} + \frac{\pi \cdot (d_{ц}^2 - d_{ш}^2)}{4} \cdot V_{п} - \mu_{кл} \cdot f_{кл} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |p_2 - p_{11}|}{\rho}}, \quad (3)$$

де  $d_{ц}$  – діаметр циліндру;  $d_{ш}$  – діаметр штока гідроциліндра;  $l$  – довжина робочого ходу поршня зі штоком;  $y$  – координата їх положення (позитивний напрямок руху  $Y$  поршня зі штоком показаний на рис. 1);  $E$  – об'ємний модуль пружності робочої рідини;  $\mu_{др}$  – коефіцієнт витрати вхідного дроселя;  $d_{др}$  – діаметр витрати вхідного дроселя;  $p_{ном}$  – номінальний тиск гідросистеми;  $V_{п}$  – швидкість руху поршня зі штоком гідроциліндру;  $\mu_{кл}$  – коефіцієнт витрати зворотного клапана;  $f_{кл}$  – площа прохідного отвору клапану:

$$f = \pi \cdot d_c \cdot x(t) \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \left[1 - \frac{x}{2 \cdot d_c} \cdot \sin(\beta)\right], \quad (4)$$

де  $\beta$  – кут конуса запірного елементу зворотного клапану;  $x$  – координата положення золотника

із якорем пропорційного електромагніту (позитивний напрямок  $X$  руху заслінки показаний на рис. 1).

Тиск  $p_{11}$  в каналі сопла, електрогідралічного перетворювача описується наступним рівнянням нерозривності:

$$\frac{dp_{11}}{dt} \cdot \frac{4 \cdot E}{\pi \cdot (d_c^2 - d_T^2) \cdot l_c} = \mu_{кл} \cdot f_{кл} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |p_2 - p_{11}|}{\rho}} - \mu_{с-з} \cdot f_{с-з} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |p_{11} - p_{зл}|}{\rho}}, \quad (5)$$

де  $l_c$  – довжина каналу сопла;  $\mu_{с-з}$  – коефіцієнт витрати елементу сопло-заслінка;  $p_{зл}$  – тиск у зливній магістралі;  $f_{с-з}$  – площа прохідного отвору елементу сопло-заслінка:

$$f_{с-з} = \pi \cdot d_c \cdot (\delta - E), \quad (6)$$

де  $\delta$  – максимальна відстань, на яку може відійти заслінка від торця сопла.

Динаміку руху поршня зі штоком навантаженим корисною масою  $m$  визначає диференціальне рівняння:

$$\frac{d^2y}{dt^2} \cdot m_{п.пр} = \frac{\pi \cdot d_{п}^2}{4} \cdot p_1 - \frac{\pi \cdot (d_{п}^2 - d_{ш}^2)}{4} \cdot p_2 - F, \quad (7)$$

де  $m_{п.пр}$  – приведена маса поршня, штока та корисного інерційного навантаження  $m$ ;  $p_1$  – тиск в поршневій порожнині гідроциліндра;  $F$  – корисне силове навантаження на штоку гідроциліндра.

Силою тертя між поршнем і корпусом гідралічного циліндру можна знехтувати, оскільки вона значно менша ніж сила корисного навантаження та зусилля, що створюється перепадом тисків в порожнинах гідроциліндру.

Рівняння нерозривності для поршневої порожнини гідроциліндру та зв'язаної із нею (рис. 1) міждросельною порожниною елементу сопло-заслінка електрогідралічного перетворювача має вигляд:

$$\frac{dp_1}{dt} \cdot \frac{\pi \cdot d_{ц}^2 \cdot (y + 0,01)}{4 \cdot E} = \mu_{др} \cdot \frac{\pi \cdot d_{др}^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |p_{ном} - p_1|}{\rho}} - \frac{\pi \cdot d_{ц}^2}{4} \cdot V_{п}, \quad (8)$$

де  $V_{п}$  – швидкість руху поршня зі штоком гідроциліндру  $\frac{dC}{dt} = V_{п}$ .

Диференціальні рівняння (1)-(3), (5), (7), (8) приведемо до форми Коши та запишемо у вигляді системи:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dI}{dt} &= \frac{1}{L} \cdot (U - I \cdot R); \\ \frac{dV_3}{dt} &= \frac{1}{m_{3, \text{лп}}} \cdot \left( k_1 \cdot I - c \cdot x - \left( \frac{1,8}{0,47 + v} + 1 \right) \cdot \rho \cdot v \cdot V_3 - \frac{\pi \cdot (d_c^2 - d_E^2)}{4} \cdot p_{11} \right); \\ \frac{dE}{dt} &= V_3; \\ \frac{dp_{11}}{dt} &= \frac{4 \cdot E}{\pi \cdot (d_c^2 - d_T^2) \cdot l_c} \cdot \left( -\mu_{c-3} \cdot \pi \cdot d_c (\delta - x) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |p_{11} - p_{3л}|}{\rho}} + \right. \\ &\quad \left. + \mu_{кл} \cdot \left( \pi \cdot d_c \cdot x(t) \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \left[ 1 - \frac{x}{2 \cdot d_c} \cdot \sin(\beta) \right] \right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |p_2 - p_{11}|}{\rho}} \right); \\ \frac{dp_2}{dt} &= \frac{4 \cdot E}{\pi \cdot (d_{ц}^2 - d_{ш}^2) \cdot (1 - y)} \cdot \left( \mu_{дп} \cdot \frac{\pi \cdot d_{дп}^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |p_{ном} - p_2|}{\rho}} + \frac{\pi \cdot (d_{ц}^2 - d_{ш}^2)}{4} \cdot V_{п} - \right. \\ &\quad \left. - \mu_{кл} \cdot \left( \pi \cdot d_c \cdot x(t) \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \left[ 1 - \frac{x}{2 \cdot d_c} \cdot \sin(\beta) \right] \right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |p_2 - p_{11}|}{\rho}} \right); \\ \frac{dV_{п}}{dt} &= \frac{1}{m_{п, \text{лп}}} \cdot \left( \frac{\pi \cdot d_{ц}^2}{4} \cdot p_1 - \frac{\pi \cdot (d_{ц}^2 - d_{ш}^2)}{4} \cdot p_2 - F \right); \\ \frac{dC}{dt} &= V_{п}; \\ \frac{dp_1}{dt} &= \frac{4 \cdot E}{\pi \cdot d_{ц}^2 \cdot (y + 0,01)} \cdot \left( \mu_{дп} \cdot \frac{\pi \cdot d_{дп}^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |p_{ном} - p_1|}{\rho}} - \frac{\pi \cdot d_{ц}^2}{4} \cdot V_{п} \right). \end{aligned} \right. \quad (9)$$

Кількість змінних в системі (9) ( $I$ ,  $V_3$ ,  $x$ ,  $p_2$ ,  $p_{11}$ ,  $V_{п}$ ,  $y$ ,  $p_1$ ) дорівнює кількості диференціальних рівнянь, отже вона є замкнутою та придатною до вирішення численими методами.

встановлених елементів сопло-заслінка та зворотного клапану, а по-друге, визначити вплив конструктивних параметрів мехатронного модуля на його характеристики.

## 5. Висновки та перспективи подальших досліджень

Вперше розроблені диференціальні рівняння, які описують робочі процеси мехатронного модуля поступального руху, побудованого із використанням запатентованих автором електрогидравлічних перетворювачів. Об'єктно-орієнтована нелінійна математична модель (9) безпосередньо містить конструктивні параметри вказаного пристрою.

Система (9) нелінійних диференціальних рівнянь описує динаміку мехатронного модуля, якщо регулювання здійснюється за рахунок роботи електрогидравлічного перетворювача, підключеного до штокової порожнини гідроциліндру. При відповідному доопрацюванні вона може бути використана у випадку, якщо працює перетворювач, підключений до поршневої порожнини, а також коли активні обидва перетворювачі (рис. 1).

Численне розв'язання системи нелінійних диференціальних рівнянь (9) дозволить, по-перше, обґрунтувати гіпотезу про можливість сумісної роботи послідовно

## Література

1. Product catalog industrial hydraulics. – Режим доступу: <http://www.boschrexroth.com>.
2. Hydraulic controls products. – Режим доступу: <http://www.parker.com>
3. Лозінський Д.О. Пропорційний електрогидравлічний розподільник з незалежним керуванням потоків для мобільних машин : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.08 “Машинознавство” / Д.О. Лозінський. – Вінниця, 2010. – 20 с.
4. Петров О.В. Гідропривод чутливий до навантаження на базі мультирежимного гідророзподільника : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.08 “Машинознавство” / О.В. Петров. - Вінниця, 2010. - 20 с.
5. Репінський С.В. Система керування аксіально-поршневого регульованого насоса з профільованим вікном золотника комбінованого регулятора подачі: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.02.08 “Машинознавство” / С.В. Репінський. – Вінниця, 2011. – 20 с.
6. Лозинский Д. А. Сравнительные исследования вариантов первого каскада пропорционального электрогидравлического распределителя / Д. А. Лозинский, Л. Г. Козлов, Е. И. Шевчук // Наукові праці ВНТУ. Машиностроение и транспорт. – Вінниця: ВНТУ. – 2012. – № 2. – С. 1-7.
7. 1. Пат. 76766 Україна, МПК (2006) F15B 3/00. Електрогидравлічний підсилювач / Сковорчевський О.Є.; заявник та патентовласник Сковорчевський О.Є. – № 2004021138 ; заявл. 17.02.04 ; опубл. 15.09.06, Бюл. № 9.
8. Сковорчевський О.Є. Математична модель багатофункціонального пропорційного електрогидравлічного перетворювача / О.Є. Сковорчевський // Східноєвропейський журнал передових технологій . –2006. – № 6. – С. 30-33.
9. Сковорчевський О.Є. Математичне моделювання статичних робочих процесів електрогидравлічних перетворювачів нормально-закритого типу / О.Є. Сковорчевський // Вісник НТУ «ХПІ»: Нові рішення у сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ» – 2011. – № 45. – С. 48-54.
10. Сковорчевський О.Є. Експериментальні дослідження статичних робочих процесів електрогидравлічного перетворювача нормально-закритого типу / О.Є. Сковорчевський // Механіка та машинобудування. Науково-технічний журнал. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – № 2. – С. 43-51.
11. Сковорчевський О.Є. Верифікація нелінійних математичних моделей пропорційної гідроапаратури на основі експериментальних досліджень / О.Є. Сковорчевський // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДонНТУ. – 2011. – Випуск 22(195). – С. 236-245.

**Abstract**

*The article considers the mechatronic module designed using the patented electrohydraulic valves with decreasing regulation curve. The design of this valve was based on the possibility of collaborative performance of nozzle valve and check valve. The check valve was installed sequentially to nozzle valve and is driven by the same proportional solenoid. The purpose of research was to create a nonlinear object-oriented mathematical model. We applied the techniques of electrical engineering, theoretical mechanics and technical hydraulics. As a result, we obtained a nonlinear system of eight differential equations. This system contains eight variables, as well as structural and functional parameters of mechatronic module. Numerical integration of the mathematical model permits to study the influence of structural and functional parameters on the dynamic and static characteristics of mechatronic module. Thus, the following research should concern the numerical integration of the model with Runge-Kutta or Radau methods to obtain the necessary structural and functional parameters*

**Keywords:** *mechatronic module, electrohydraulic valve with decreasing regulation curve, differential equations, nonlinear object-oriented mathematical model*